

УДК 621.865:669.018.2

СПЛАВЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Вяжи И. Э.

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Санкт-Петербург, Россия, vahhi@ftim.spbstu.ru*

В настоящем обзоре рассматриваются исполнительные, приводные устройства с использованием сплавов с эффектом памяти формы (СПФ) в форме пружин. В дальнейшем будут рассмотрены другие формы силовых элементов из СПФ (пруток, пластина и т.д.).

В технических применениях (в реальных конструкциях, в изобретениях, патентах и т.д.) используется большое число конструктивных решений, при которых сплав с эффектом памяти формы, при термоциклировании, приводит к различным типам перемещений, как выходных элементов конструкций напрямую, так с использованием передаточных механизмов. Рассмотрим простейшие схемы организации движений в макро, мини и микро размерах. В таблице 1 систематизированы основные, простейшие типы движения и основные типоразмеры СПФ. Невозможно, конечно, дать полное многообразие используемых технических решений, но большинство применений укладывается в эту схему деления.

Таблица 1

Тип движения \ размеры и форма СПФ	Макро и мини	Микро
Поступательное (линейное)	Пружина	Лента
	Проволока	Тонкая проволока
	Стержень	Пленка
	Лента	
	Пластина	
Вращательное (поворотное)	Пружина	Лента
	Проволока	Тонкая проволока
	Стержень	Пленка
	Лента	
	Пластина	
Сложное (комбинированное)	Пружина	Лента
	Проволока	Тонкая проволока
	Стержень	Пленка
	Лента	
	Пластина	

При использовании СПФ в исполнительных устройствах, деформация и генерируемое напряжения самого сплава преобразуется в перемещение и усилие выходного звена механического устройства путем термоциклирования через интервалы темпера-

тур прямого и обратного мартенситных превращений. Для регулирования положением исполнительных устройств возможно использование малых гистерезисных петель в интервалах характеристических температур. Важно, чтобы параметры сплава были бы стабильны для требуемого числа циклов работы. В таких устройствах может использоваться деформация СПФ в виде кручения, изгиба, растяжения и изгиба, а также их комбинация, проявляющаяся при обратном мартенситном превращении, тогда как при охлаждении сплав деформируется за счет контрэлемента (КЭ) и возвращается в начальное, деформированное состояние. Элемент технического устройства, состоящий из СПФ, будем называть силовым элементом (СЭ). В общем случае, в состав силового элемента может входить нагреватель, датчик температур и т.д.

В данной статье рассматривается организация макро и мини линейного перемещения технических устройств за счет пружинных СПФ. Габаритные размеры макро механизмов, как правило, более 50 мм, мини до 50 мм. Силовой элемент в форме пружины, изготовленный из СПФ, обладает важным преимуществом, способностью к большим перемещениям, однако развиваемое усилие не велико. Деформация пружины, а, следовательно, перемещение устройств осуществляется в результате кручения и изгиба проволоки из СПФ.

На рис.1 представлены несколько вариантов исполнительных устройств линейного перемещения, где «Х» - направление перемещения нагрузки «Р» при нагревании пружинного силового элемента. Будем рассматривать однонаправленный эффект памяти, так как его использование для макро и мини перемещений исполнительных устройств на данный момент пока более предпочтительнее.

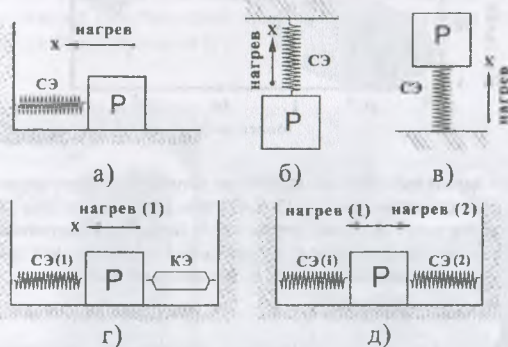


Рис.1. Схемы исполнительных устройств линейного перемещения: а) силовой элемент (СЭ) растяжения; б) использование противовеса; в) силовой элемент сжатия; г) использование контрэлемента (КЭ), д) использование двух силовых элементов.

Предварительно пластически растянутый силовой элемент растяжения (рис.1, а) совершает полезную механическую работу и перемещает нагрузку «Р», при этом, для такого расположения, последующее термоциклирование, как правило, не вызывает дальнейших перемещений нагрузки. Возврат растянутого СЭ (рис.1, б), в отличие от рис.1, а, осуществляется в режиме пластичности превращения за счет веса нагрузки «Р». При термоциклировании силовой элемент совершает колебательное, поступательное движение. Аналогичные варианты можно предусмотреть для силового элемента

сжатия (рис.1, а). Возврат в растянутое состояние силового элемента (рис.1, з) осуществляется за счет упругого контрэлемента (КЭ) при охлаждении. Чаще всего в качестве КЭ используют обычную пружину растяжения или сжатия. При этом полезное перемещение и усилие нагрузки направлено в одном направлении при обратном мартенситном превращении. Использование в качестве возвратного элемента другого пружинного силового элемента СПФ (рис.1, д) позволит получать полезное усилие в двух направлениях, поочередно, в противофазе, нагревая и охлаждая силовые элементы (1) и (2).

Пружины из СПФ как силовые элементы исполнительных устройств, за счет своей простоты, нашли применение во многих реальных и потенциальных (патенты, изобретения) конструкциях [1-3].

Анализ и сравнение исполнительных устройств (приводов) различного принципа действия показали (рис.2) что устройство по схеме рис.1, д., имеет существенное преимущество, по отношению удельной мощности к массе устройства, с традиционными приводами [4].

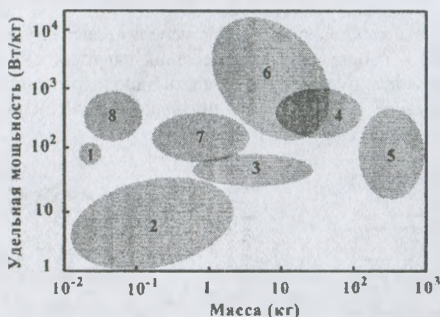


Рис.2. Сравнение характеристик исполнительных устройств различного назначения:

1. Устройство из СПФ (по схеме рис.1, д); 2. Двигатель постоянного тока с редуктором;
3. Двигатель переменного тока с волновой передачей; 4. Бензиновый автомобильный двигатель;
5. Дизельный автомобильный двигатель; 6. Гидравлический привод;
7. Пневматический привод; 8. Человеческая мышца.

Это дает возможность создания компактных, легких исполнительных устройств на основе СПФ, развивающих большие усилия.

Рассмотрим примеры использования Ni-Ti пружин в качестве силовых элементов (рис.3 и 4). Исполнительное устройство на рис.3 содержит Ni-Ti пружину (1) и стальную возвратную пружину (2). Привод предназначен для создания полезного усилия при линейном перемещении выходного звена. Привод может развивать усилие 2Н – 6Н, при перемещении штока 8мм - 12мм, в зависимости от типоразмера привода. Время нагрева 30с - 60с, время охлаждения от 180с - 240с. Нагрев осуществляется за счет электрического тока. Габаритный размер привода 24×22×10мм. Потенциально, привод в таких габаритах может развивать усилия до 30Н, но с уменьшением числа циклов срабатывания и быстродействия.

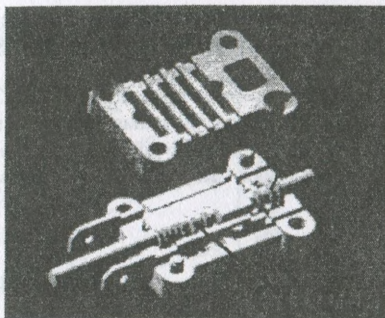


Рис.3. Исполнительный линейный привод с использованием пружины с СПФ (1) и стальной контрпружины (2) (Компания А.М.Т., Бельгия).

Рассмотрим примеры использования пружинных приводов в бытовой технике. Пружина СПФ (1) в чайнике (Emide water kettle) используется как термочувствительный элемент системы отключения электричества от нагревателя воды при достижении температуры кипения воды (рис.4, а). Нагрев пружины осуществляется от пара, возврат за счет упругого элемента системы. На рис.4, б представлен термочувствительный узел тостера (Rowenta Toaster). Если при нагреве температура тостера превысит критическую температуру для пластмассовых деталей $+60^{\circ}\text{C}$, пружина СПФ (1) взводит механизм против расплавления пластмассовой крышки тостера. Возврат осуществляется за счет упругой стальной контрпружины (2).

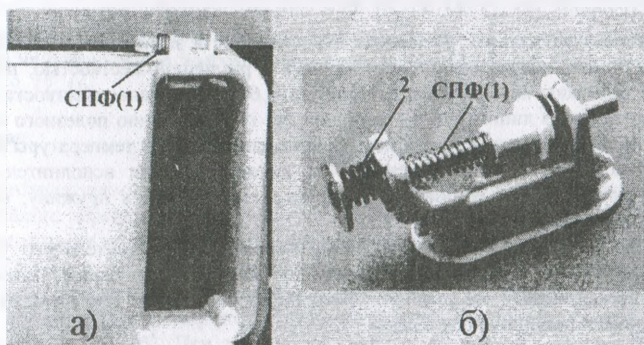


Рис.4. Применение пружин СПФ в бытовой технике: а) чайник; б) тостер. (компания А.М.Т., Бельгия).

Конструкция линейного привода (Electric Piston Overview), серийно выпускаемого Mondo-Tronics Inc, США, показана на рис.5. Привод выполнен по схеме на рис.1, 2, и развивает полезное усилие на штоке (3), равное 4.5Н при сокращении пружины (1) из СПФ на 19 мм. Упругая стальная пружина(2) осуществляет возврат штока в начальное положение с максимальным натягом в 2.5Н.

На рис.5, а и рис.5, в показано первоначальное положение устройства при растянутой (мартенситное состояние) пружине из СПФ, а рис.5, б при сжатой пружине (аустенитное состояние).

Нагрев осуществляется путем прямого прохождения тока 2А-5А через СПФ. Быстродействие привода: 1-2 цикла в минуту. Пружина изготовлена из Ni-Ti с $A_f = 90^\circ\text{C}$ и $M_f = 65^\circ\text{C}$. Масса привода 10г и диаметр корпуса 9 мм. Стоимость одного привода на рис.3 и рис.5 равно 5-10 долларов США и существенно зависит от количества покупаемых приводов.

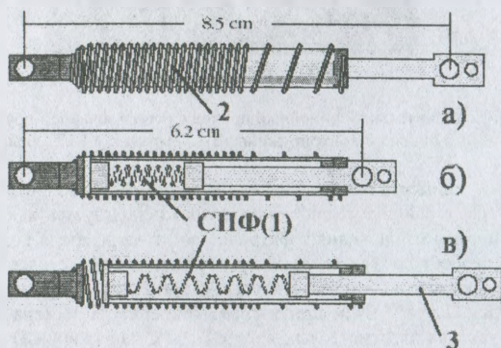


Рис.5. Привод Electric Piston Overview с использованием пружины с СПФ (1) и стальной контрпружины (2).

Параметры пружинных, исполнительных устройств зависят от жесткости контрпружины [2]. Так, использование контрпружины с различной жесткостью, получают различные величины перемещения и усилия (рис.6а). Увеличение жесткости пружины (увеличение наклона линии «А» к «В») приводит к уменьшению полезного перемещения от $d1$ до $d2$ и, одновременно, к повышению максимальной температуры нагрева, а, следовательно, градиента напряжения. При конструировании исполнительных устройств, с учетом других требований, надо стараться выбирать пружину, как можно меньшей жесткости.

Регулирование перемещения и усилия на выходе исполнительного устройства можно осуществлять с помощью регулирования длины контрпружины. Пример такого регулирования приведен на рис.6, б. Устройство состоит из пружины из СПФ(1), контрпружины и регулируемых болтов.

При увеличении длины контрпружины за счет раскручивания болта (1), линия «В» контрпружины (рис.6, а) смещается параллельно вправо (линии «С» и «Д»). В этом случае изменяется перемещение штока от $d2$ до $d3$. Использование регулирующего болта (2) позволяет изменять параметры устройства (смещение линия L на рис.6, а). Таким образом, можно получить закон изменения перемещения и усилие устройства в зависимости от параметров пружины из СПФ, контрпружины, перемещений регулирующих болтов и температуры. На этом принципе работают терморегулируемые клапаны смешивания горячей и холодной воды [2].

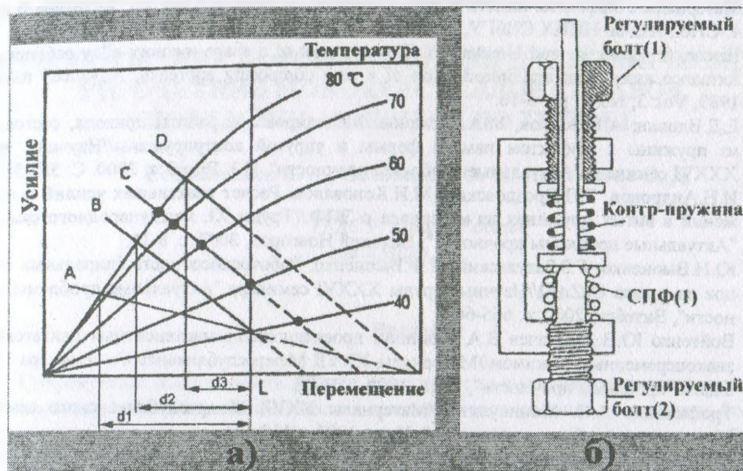


Рис.6. Регулирование перемещения и усилия: а) зависимость параметров устройства от жесткости контрпружины (линии «А» и «В») и изменение длины контрпружины (линии «В», «С», «D»); б) регулируемое устройство.

В списке литературы приводятся статьи, посвященные исследованию пружинных образцов СПФ и устройств на их основе для организации линейного движения. Расчет пружин из СПФ приведен в [1,2, 5, 6, 9, 10, 12, 14,]. Экспериментальные исследования при термоциклировании образцов описаны в [7, 10, 13, 15, 17, 18]. Вопросы регулирования (управления) параметрами исполнительных устройств обсуждаются в [1,2]. Исследования на циклическую долговечность проведены в [2, 17, 18]. Примеры описаны в [1,2, 3, 8, 9, 12, 16].

Заключение

В настоящее время наиболее часто применяемым техническим решением организации линейного перемещения в исполнительных устройствах на основе СПФ является применение пружин из таких сплавов. Основное преимущество в этом случае является достаточно большое перемещение пружины при небольшой до 2% деформации сплава с эффектом памяти формы и генерируемом напряжении до 200 МПа. Небольшая деформация и генерируемое напряжение СПФ позволяют увеличить цикличность пружинных устройств до 10^6 . При этом требуемое усилие выходного звена устройства подбирается за счет диаметра проволоки из СПФ. В электрических устройствах, как правило, на основе сплава NiTi, нагрев происходит прохождением тока через СПФ, что требует соответствующих мер защиты от короткого замыкания.

Список литературы

1. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys (T.W.Duering, K.N.Melton ed.), Butterworth-Heinemann, New York, 1990.
2. K.Otsuka, C.M.Wayman. Shape Memory Materials. Cambridge University press, UK, 1999.

3. Материалы с эффектом памяти формы: Справочное издание//Под ред. Лихачева В.А.–Т. 4.–СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998.
4. Hirose, S., Ikuta, K. and Umetani, Y. Development of a shape memory alloy actuator: performance assessment and introduction of a new composing approach, *Advanced robotics*, 1989, Vol. 3, No. 1, pp. 3-16.
5. Е.Д.Вдовин, А.Е.Волков, М.А.Хусаинов. Моделирование работы привода, состоящего из пружины с эффектом памяти формы и упругой контрпружины//Научные труды XXXVI семинара "Актуальные проблемы прочности". Ч.2. Витебск, 2000. С. 557-564.
6. И.Н.Андронов, Г.П.Дроздовский, М.И.Коновалов. Расчет реактивных усилий и напряжений в витых пружинах из материала с ЭПФ.//Труды XL международного семинара "Актуальные проблемы прочности", Великий Новгород, 2002, с. 8-11.
7. Ю.Н.Вьюненко, Г.З.Затульский, Л.Ф.Вьюненко. Работоспособность спиральных образцов из сплава CuZnAl//Научные труды XXXVI семинара "Актуальные проблемы прочности", Витебск, 2000, с. 665-668.
8. Войтенко Ю.В., Лихачев В.А. Принцип проектирования мартенситных двигателей со знакопеременным режимом//Материалы XXVII Межреспубликанского семинара "Актуальные проблемы прочности", Ухта, 1992, с.23-25.
9. Трофименко А.П. Манипулятор//Материалы XXVII Межреспубликанского семинара "Актуальные проблемы прочности", Ухта, 1992, с.119-121.
10. Мовчан А.А., Мозафари А., Казарина С.А. Экспериментальное и теоретическое исследование механического поведения пружин различного вида из никелида титана//Научные труды II международного семинара "Современные проблемы прочности" им. В.А. Лихачева, Старая Русса, 1998., Том 2, с. 31-34.
11. Беляков В.Н. Исследование термодинамической работоспособности TiNi сплавов в условиях неполного мартенситного превращения//Научные труды II международного семинара "Современные проблемы прочности" им. В.А. Лихачева, Старая Русса, 1998.,Том 2, с. 210-214.
12. Беляков В.Н., Хусаинов М.А. Инженерный расчет геометрических параметров взаимосвязанных пружин для работы в неполном интервале мартенситных превращений//Материалы XXIX Межреспубликанского семинара "Актуальные проблемы прочности", Псков, 1993, с.549-552.
13. Беляков В.Н., Хусаинов М.А. Исследование реактивных напряжений при жестком противодействии и наличии свободного хода Материалы XXIV международного семинара "Актуальные проблемы прочности", Рубежное, 1990, с.219-224.
14. С.А. Абдрахманов. Деформация материалов с памятью формы при термосиловом воздействии, Бишкек, Илим, 1991, 117с.
15. Д.Б. Чернов. Конструкционное применение сплавов с памятью формы. М:1999, НИИСУ, 232с.
16. Хусаинов М.А. Вестник НовГУ, №19, 2001, с.32.
17. Беляев С.П., Демина М.Ю. Термомеханические характеристики пружинного привода с рабочим элементом из сплава TiNi с памятью формы//Материалы XXXVIII семинара "Актуальные проблемы прочности", Санкт-Петербург, 2001, с.456-459.
18. Хусаинов М.А., Волнянская О.Ю. Особенности термомеханического поведения рабочего элемента из никелида титана в условиях силового противодействия и теплосмешения//Материалы XXXVIII семинара "Актуальные проблемы прочности", Санкт-Петербург, 2001, с.499-502.